

# 埋込み杭の品質保証と載荷試験による鉛直支持力の管理

著者	堀口 隆司
号	1906
発行年	1999
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10713">http://hdl.handle.net/10097/10713</a>

氏 名	堀 口 隆 司 <sup>ほりぐち たかし</sup>
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成 1 1 年 1 0 月 1 3 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最終学歴	昭和 3 8 年 3 月 立命館大学理工学部土木工学科卒業
学位論文題目	埋込み杭の品質保証と載荷試験による鉛直支持力の管理
論文審査委員	主査 東北大学教授 杉村 義 広 東北大学教授 山口 育 雄 東北大学教授 柳 澤 栄 司

## 論文内容要旨

### 第 1 章 序論（研究の動機と背景）

筆者は 1 9 6 3 年に大学を卒業して以来，一貫して杭に関する業務に携わってきた。その中で，新素材，新配合とオートクレーブ養生により高強度コンクリートを生み出すという画期的な研究に参画することができ，引き続いて高強度コンクリート杭や鋼管コンクリート杭を開発するとともに，その施工法の開発研究に従事してきた。

高強度コンクリート杭など既製杭は，当初ディーゼルハンマーで打ち込まれるのが通常であった。打込み時の貫入量とリバウンド量がすべての杭について測定されることから，杭打ち式によって支持力が求められ，設計支持力と杭の健全性の確認が全数検査として行えたので，打込み杭では品質管理と品質保証が完全な意味でできていたといえる。しかし，1 9 6 8 年に騒音規制法が，つづいて 1 9 7 6 年には振動規制法が施行されたことから，市街地での建設が主体である建築の基礎工法では打込み杭が使えなくなり，埋込み杭工法との大幅な代替現象が発生した。埋込み杭工法は無騒音・無振動の観点からは優れた工法であるが，杭が設計通りに埋め込まれて支持力が得られているかの確認が行いにくく，「施工のモニタリングによる品質管理」と「抜き取り検査としての静的鉛直載荷試験」を以って品質保証するという間接的管理に依存せざるを得ず，打込み杭の直接的全数管理に比べて信頼性の点で見劣りするのが実状である。したがって，安全性と経済性のバランスのとれたより信頼性の高い埋込み杭の品質管理と品質保証の仕組みを構築することが要望されており，それに應える必要性が増している。これが本研究の動機と背景である。

## 第2章 載荷試験の荷重伝達理論

静的載荷試験 (S L T) とくに杭頭で載荷する試験では, 荷重を載荷し, 杭の沈下量を知ることによって杭の鉛直支持力を確認することができる。上部構造の荷重が杭に伝達される機構と同様の載荷方式を用いているという点で, 品質管理の手段としては最適であるが, 時間と費用が大きくかかる。S L T に準じかつその欠点を補う方法として, より簡便な動的載荷試験 (D L T) が開発され, 使用されているが, さらに, 利便性のある試験方法が求められているなど, 載荷試験には種々の方法があり, それぞれ異なった考えに基づいていると認識されている現状にある。しかし, 極く基本に立ち戻って考えれば S L T も D L T も載荷エネルギーと歪みの関係から杭の支持力を知る点では変わりないのであり, 例えば D L T においても与えるエネルギーによって生ずる衝撃波の振動数成分と時間・速度効果 (Dynamic Effect) の影響を考慮し, 地盤と杭周面摩擦抵抗の線形性あるいは非線形性の条件を考慮すれば, S L T と同じ理論上で扱うことができ, 起源は1つの運動方程式に集約できることが判明した。すなわち, 各種載荷試験法の関係は以下のように示すことができる。

	$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$    加速度    波動の伝播	$-\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}$    歪み分布	$+\frac{k}{AE} u(x,t)$    変位に対する抵抗	$+\frac{\xi}{AE} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}$    速度減衰	= 0
DLT (動的)	○	○	○	○	
SLT (静的)	×	○	○	×	
IT (非破壊)	○	○	×	○	
MR (ミッドレンジ)	○	○	○	○	
			(弾性範囲のみ)		

(注) ○: この項が存在する  
×: この項は工学上無視できるので存在しないものと見なす

この普遍的方程式において,

- ・ D L T は第1～第4項まですべてが存在する。
- ・ S L T は第2・3項のみが存在し, 釣り合いの方程式である。
- ・ I T (非破壊診断) は与えるエネルギーが小さいので, 第3項は実測できず無視する。したがって波動の伝播のみから求まる杭の断面変化等の健全性は検証できるが支持力を知ることはできない。
- ・ M R は杭の支持力と健全性を確認するため著者らが開発したも

ので，DLTとSLTの中間的なエネルギーを与えて土の抵抗と変位の関係を弾性範囲内で把握する．

### 第3章 ミッドレンジ法

MRはDLTとITの中間的なエネルギーを与えることで，DLTと同程度の歪みレベルとIT並みの衝撃時の波長を確保して杭の形状など健全性の検証を可能にすると同時に，変位はSLTほどの非線形性領域（したがって極限支持力）までは無理としても，弾性的な範囲での現出は維持することにより，初期バネ係数を知ることによって初期の支持力が推定できることを意図したものである．その特徴として，ITより大きなハンマーを用いるのでITでは不可能な長い杭の健全性を知ることができること，実施に必要な費用や時間はDLTやSLTに比べ格段に小さく数量効果が高いこと，解析はDTLと同様に行えば良いことなどがあげられる．

MRの適用例として，施工後3日目に兵庫県南部地震（1995）に遭遇した場所打ちコンクリート杭の場合を解析した．地震を経験するまでの杭の養生時間が短いため，コンクリート強度や鉄筋との付着強度が十分に発現されていない懸念があったので調査を行ったものである．結果として，ハンマー（2.7 kN : 270 kg）の約200倍の支持力（560 kN : 56 ton）が確認でき，設計支持力（約600 kN : 60 ton）をほぼ確保できていることが判明した．次に，地盤応答解析から地震力によって杭に作用した曲げ圧縮力は（0.4 MPa : 4 kg / cm<sup>2</sup>）と得られ，この杭のコンクリート3日強度（14 MPa : 140 kg / cm<sup>2</sup>）に比較しても3%と非常に小さく，地震によって杭が損傷を受けることは無かったと推定できた．

### 第4章 静的及び動的載荷試験

杭の載荷試験の目的は設計・施工法の評価のための研究面と実際にでき上がった杭の性能（支持力）確認の二面性がある．この観点から，各種載荷試験法の特徴を比較検討してみると以下のようなになる．

1) SLTは載荷方向により2種類があるが，いずれも常時の状態に近い試験条件で行うため，直接的に正確に支持力が予測でき，解析も容易であるが，実験に要する時間と費用が極めて大きく掛かり，数量効果がない．

2) DLTは比較的大きなエネルギーを与えるので，杭体の歪みが大きく，且つ，杭周辺摩擦抵抗も非線形範囲までフルモービライズされ，極限の支持力を推定でき，実験に要する費用や時間はSLTよりは少ない．しかし，解析が難しくノウハウが必要となる

3) 新たな方法として、S T A T N A M I C (中間的載荷試験) があり、D L Tより与えるエネルギーは小さいが、原理的には、載荷時間を長くし、衝撃の反射波が杭頭に戻ってきた時点で荷重が下向きに掛かるようにしてS L Tに近い状態を作ることにより、近似的な支持力の確認ができる。しかし、実績が少ないので、信頼性に不安な面がある。

すなわち、主として荷重の作用時間に応じての特徴を示す各種載荷試験法が存在している現状であり、目的に応じてこれらの特徴を吟味し、さらに経済性と信頼性を考慮して効果的な試験法の組み合わせを選択することが重要である。

## 第5章 静的載荷試験の埋込み杭への適用

日本全国にわたる14箇所の敷地において、プレボーリング工法による埋込み節杭の静的載荷試験を行った。杭の施工法として2つのタイプのオーガーによる比較を行っている。すなわち掘削土を全面的に排出するか、土質に応じて30～60%排出するかによって全排土工法(F E S)と低排土工法(L E S)に分類し、前者は10本、後者は11本の載荷試験を敷地ごとに行い、比較した。その結果、L E Sによる杭の方がやや支持力が大きくなるが、設計的な観点からは両者の支持力—沈下関係は大きな差が無く、同等と考えて良いことが判明した。したがって、砂質土、粘性土、有機質土の土質ごとにN値をベースにして杭先端支持力、杭周面摩擦抵抗との関係を正規分布処理した回帰式を求め、データベース化するとともに埋込み節杭の設計支持力算定式として新たに次式を提案した。

$$R_B = \frac{\pi D^2 q}{4} + \sum \{ \tau_S \times L_S + \tau_C \times L_C + \tau_o \times L_o \} \pi D_b$$

$$q = 152N_P - 130 \text{ (kPa)}$$

$$\tau_S = 4.4N_S + 27 \text{ (kPa)}$$

$$\tau_C = 5.9N_C + 17 \text{ (kPa)}$$

$$\tau_o = 8.5N_o - 10 \text{ (kPa)}$$

$R_B$ : 算定支持力  
 $q$ : 先端支持力  
 $\tau_S$ : 砂質土の摩擦抵抗力  
 $\tau_C$ : 粘性土の摩擦抵抗力  
 $\tau_o$ : 有機質土の摩擦抵抗力

この提案式は実務界では広く応用されるに至っている。

また、静的載荷試験の方法には、載荷方向により伝統的な杭頭載荷試験の他に比較的新しい杭先端載荷試験の2種類がある。その試験法の差異による影響に関して、埋込み節杭と場所打ちコンクリート杭について比較実験を行った。その結果、杭先端支持力、杭周面摩擦抵抗に関して、工学的に同等と考えて良いことが確認された。

## 第6章 静的載荷試験結果による限界状態設計法

建築構造設計の分野は、今後性能設計へ移行して行く動向にある。第5章に示した支持力算定式は現行の設計体系の範囲内での提案であったので、新しく性能設計に対応することを想定して支持力のば

らつきを考慮して信頼性設計法や限界状態設計法を念頭に置き信頼性指標を導入した支持力算定式を作成した。すなわち，多数の載荷試験結果のデータ（300以上）について対数正規分布処理を行い，実測値が計算値を下回らない信頼度（確率）が70%の場合の支持力算定式を提案した。

この提案式による計算値と実測値を対比したところ，限界信頼性指数が4.9であり，ベッカー（B e c k e r）の提案する信頼性指数3.2よりも高い値が得られ，この提案式の信頼性を確認することができた。さらに，信頼性指標の値として3.2程度が適切であると考えらるならば，設計に際して現状の安全率3を2程度まで小さくする可能性も見い出せた。

## 第7章 結 論

埋込み杭の品質保証は，地盤調査による地盤特性に基づく支持力算定式あるいは載荷試験によって設計し，施工後，杭の健全性と支持力を確認することで成立する。

本研究では埋込み杭に適用可能な支持力算定式の提案と支持力確認に有効な試験法の開発，さらに，これらによる品質保証の仕組みの構築を意図した。その実現のために，まず，現行で実施されている載荷試験法をレビューした結果，それらすべてが基本的な運動方程式の各項を取捨選択することで整理できることを見出し，あわせてそれらを補完する関係にあるミッドレンジ法を開発した。次に，多くの静的載荷試験結果を解析することによりデータベース化し，正規分布処理して現行の設計体系に適合する支持力算定式を提案した。さらに，今後，移行の動向にある性能設計を見通した上で，信頼性設計法と限界状態設計法を念頭に信頼性指標を導入した対数正規分布処理に基づく支持力算定式を提案した。このことによって，安全性と経済性のバランスを考慮した埋込み杭の品質保証の仕組みを構築することができた。

以上

## 論文審査結果の要旨

近年、騒音振動による建設公害防止策として制定された騒音・振動規制法の施行によって既製杭の施工法は打込み杭から埋込み杭へ大幅に代替した。打込み杭が施工時における挙動測定によって支持力確認を容易にする直接的品質管理ができるのに対し、埋込み杭は載荷試験等による間接的品質管理に頼らざるを得ない現状であり、安全性と経済性のバランスのとれたより信頼性の高い品質管理と品質保証の仕組みを構築することが重要な課題となっている。

本論文は、その観点から新たな載荷試験法を開発するとともに、信頼性指標を導入した支持力算定式を新たに提案し、品質管理と品質保証の仕組みを明らかにしたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、杭の品質管理と品質保証の最重要手段が載荷試験であることを踏まえ、載荷試験における荷重伝達の機構と原理を考察し、すべての載荷試験法が基本的な運動方程式の各項の取捨選択によって整理できることを見出した上で、新しい載荷試験法、すなわちミッドレンジ法の開発の可能性を示唆している。

第3章では、新たに開発したミッドレンジ法の原理と応用例を述べている。すなわち、与える衝撃エネルギーを調整すれば、弾性的範囲内での杭体の歪みと杭周面摩擦抵抗との関係が調べられ、支持力管理の面では初期の性状が確認でき、健全性確認の面では杭の形状把握ができるなど、2面性が確保できることが示されている。さらに施工直後に兵庫県南部地震（1995）を経験した場所打ちコンクリート杭への応用例を示すことによってその実用性を証明している。

第4章では、載荷試験には設計法の評価など研究的側面と杭の性能確認の2面的な目的があるとの観点から現行の載荷試験法をレビューし、それぞれの特徴を把握した上で、目的に応じて、さらに経済性と信頼性を考慮して効果的な試験法の組み合わせを選択することが重要であるとしている。

第5章では、全排土工法と低排土工法による多数の埋込み節杭に関する載荷試験の結果を分析している。その結果、工学的には両者に大きな差はないことを確認した上で、砂質土、粘性土、有機質土ごとに、杭先端支持力、杭周面摩擦抵抗とN値の関係について正規分布を基底とした回帰式を求め、埋込み節杭の設計支持力算定式を提案している。この算定式は広く実用化されている。

第6章では、今後、建築構造設計が性能設計に移行していく動向にあわせて、5章で提案した支持力算定式を、さらに信頼性や限界状態を念頭に置いて支持力のばらつきを考慮した対数正規分布処理を適用することにより、信頼性指標 $\beta$ を導入した支持力算定式として提案している。これによれば、現行における設計式で採用している安全率をより小さめにできる可能性があることを指摘している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、埋込み杭に関して新たな載荷試験法と新たな支持力算定式を提案し、品質管理と品質保証の構築に新しい知見を見出したもので、建築工学ならびに地盤工学に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。